

M. Zitterbart¹, K. Weniger¹, O. Stanze¹, S. Aust², M. Frank³, M. Gerharz³, R. Gloger⁴, C. Görg², I. Gruber⁵, S. Hischke⁶, P. James⁷, H. Li⁴, C. Pampu⁴, C. de Waal³, E. Weiß⁸, D. Westhoff⁹, J. Wu¹, D. Yu⁴, B. Xu⁶

IPonAir- Drahtloses Internet der nächsten Generation

VORBEMERKUNG

Das BMB+F Projekt 'IPonAir - Drahtloses Internet der nächsten Generation' [1] hat im Oktober 2001 begonnen. Koordiniert wird das Projekt von Prof. Dr. M. Zitterbart vom Institut für Telematik der Universität Karlsruhe (TH). Partner aus der Industrie sind Alcatel, Ericsson Eurolab Deutschland GmbH Aachen, T-Systems Nova, Lucent, NEC Europe Ltd., Nokia sowie Siemens. Als Hochschulen sind die Universitäten Karlsruhe (Koordination), Aachen, Berlin, München, Bonn, Bremen, Essen, Kassel und die FH Friedberg vertreten. Dieser Artikel gibt einen Überblick über die in IPonAir zugrunde liegende Systemarchitektur und über die im Rahmen des Projektes durchgeführten Arbeiten zu mobilen Ad-hoc-Netzen.

1 SYSTEMARCHITEKTUR

Sowohl das Internet als auch die Mobilkommunikation haben die globale, nahezu allgegenwärtige Kommunikationsinfrastruktur der heutigen Gesellschaft nachhaltig geprägt. Insbesondere die Mobilkommunikation befindet sich in einer rasanten Entwicklungsphase. Vor wenigen Jahren noch kaum für möglich gehalten, findet man heute nahezu selbstverständlich mobile Endgeräte mit unterschiedlichen Radioschnittstellen, wie z.B. GSM/GPRS, Wireless LAN (WLAN), Bluetooth und zukünftig UMTS. Auch unter diesem Gesichtspunkt wird eine Integration der unterschiedlichen Mobilfunktechniken mit dem Internet [2] zunehmend gefordert. Im Rahmen des BMBF-geförderten Projektes IPonAir [1] steht diese Integration im Mittelpunkt des Interesses.

Zunehmend gewinnen drahtlose Internetzugänge auf Basis von WLAN an Bedeutung. So kann heute schon an sogenannten Hot-Spots, z.B. in Flughäfen, Bahnhöfen, Cafes, Messen oder Hotels, mit einem PDA oder Notebook auf Dienste im Internet über einen WLAN Access Point zugegriffen werden. Drahtlose Netze auf der Basis von WLAN bieten im Gegensatz zu zellularen Systemen wie

GSM wesentlich höhere Bandbreiten bei geringeren Kosten, allerdings auch mit einer geringeren Zellgröße.

Eine Erweiterung der Abdeckung über die Zellgröße hinaus kann durch die Verbindung mit mobilen Ad-hoc-Netzen (MANETs) erreicht werden, indem Knoten, die sich näher an einem Access Point bzw. einer Basisstation befinden, Daten für weiter entfernte Knoten weiterleiten. Darüber hinaus ist eine direkte Kommunikation zwischen Knoten möglich. So könnten z.B. Besucher einer Messe Bilder, Dateien oder Sprachnachrichten untereinander austauschen, ohne dass Infrastrukturkomponenten wie WLAN Access Points, GSM- oder UMTS-Zugangsnetze involviert sind. Das kann unter anderem sinnvoll sein,

- wenn keine Infrastruktur vorhanden ist,
- um eine vorhandene Infrastruktur zu entlasten oder
- um Kosten, die bei der Nutzung einer Infrastruktur entstehen würden, einzusparen.

Abbildung 1 zeigt ein Beispiel für die beschriebenen Szenarien.

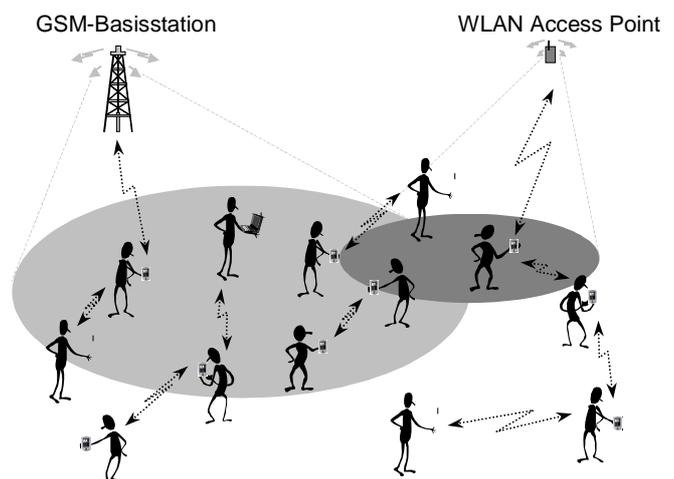


Abbildung 1: Beispielszenario IPonAir

Das oben genannte Beispielszenario stellt eine gute Ausgangsposition dar, um die dem IPonAir-Projekt zugrunde liegende Systemarchitektur zu diskutieren (vgl. Abb. 2). Verschiedene mobile Ad-hoc-Domänen können sich innerhalb oder außerhalb der Reichweite zellulärer Systeme, auch zellulare Domänen genannt, befinden. Unter einer Ad-hoc-Domäne wird ein mobiles Ad-hoc-Netz mit einheitlicher Funktechnologie verstanden. Die Kommunikation in und zwischen diesen Ad-hoc-Domänen soll unabhängig

¹ Universität Karlsruhe (TH)

² Universität Bremen

³ Universität Bonn

⁴ Siemens

⁵ TU München

⁶ T-Systems Nova

⁷ Nokia

⁸ RWTH Aachen

⁹ NEC Heidelberg

von jeglicher Infrastruktur möglich sein. Eine permanente „Abkopplung“ vom Internet ist aber nicht Gegenstand der Vision. Vielmehr wird angenommen, dass zwar nicht immer, aber doch zumindest gelegentlich eine Zugangsmöglichkeit zum Festnetz besteht, über Basisstationen zellulärer Netze oder über spezielle Ad-hoc-Gateways bei WLAN.

Darüber hinaus wird in IPonAir davon ausgegangen, dass Dienstgeber (z.B. Server) nicht nur im Festnetz, sondern auch in der Ad-hoc-Domäne existieren können. Beispielsweise kann sich auf einem Knoten in einem mobilen Ad-hoc-Netz ein Web-Proxy befinden, der insbesondere über lokal signifikante Informationen verfügt. Hierdurch werden neuartige Dienste auch innerhalb der Ad-hoc-Domänen möglich, z.B. auf Basis von Peer-to-Peer-Technologien.

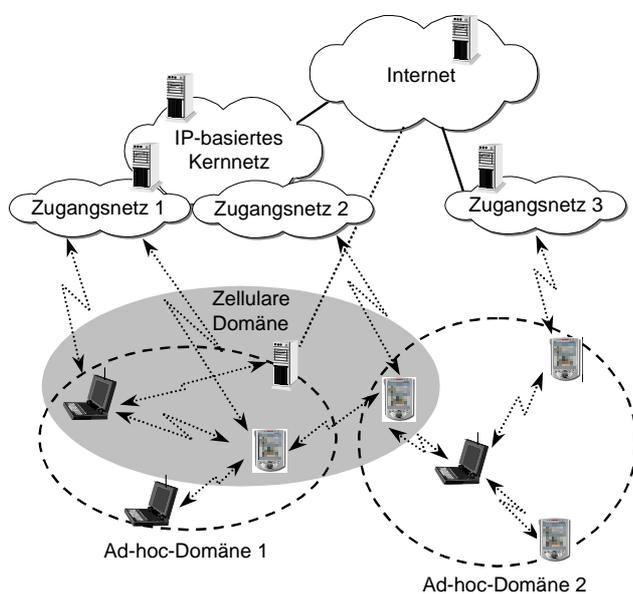


Abbildung 2: IPonAir Systemarchitektur

Im Rahmen von IPonAir wird davon ausgegangen, dass die Endgeräte typischerweise über mehrere Radioschnittstellen verfügen. Darüber hinaus unterscheiden sie sich durch verschiedene Möglichkeiten hinsichtlich des Speichers sowie der Rechenleistung. Als gemeinsamer Nenner wird angenommen, dass alle Geräte über einen IP-Stack verfügen und dass sie sowohl als Dienstnehmer als auch als Dienstgeber auftreten können. Hinsichtlich der Mobilität werden unterschiedliche Szenarien unterstützt, wobei unter anderem darauf geachtet wird, dass die Szenarien komplementär zu denjenigen des BMBF-Projekts FleetNet [3] sind.

Die in Abb. 2 dargestellte Systemarchitektur stellt eine Herausforderung dar, da die heute bekannten Protokolle nicht wirklich in der Lage sind, eine effiziente Kommunikation unter den genannten Anforderungen bereitzustellen. Von besonderem Interesse sind dabei nicht nur die Protokolle und Verfahren für mobile Ad-hoc-Netze, sondern insbesondere deren Interaktionen mit dem Festnetz sowie mit existierenden und zukünftigen Zellularnetzen. Eine der Herausforderungen im Projekt IPonAir besteht darin, stets

die beste Konnektivität zu ermitteln, getreu dem Motto „Always best connected“.

Eine grundlegende Problematik in mobilen Ad-hoc-Netzen besteht darin, dass viele Verfahren darauf aufbauen, dass eine Gruppen von einander oftmals nicht bekannten Netzknoten kooperiert, um z.B. Daten für andere Knoten weiterzuleiten. Erst so entsteht ein funktionsfähiges Netz. Jeder Netzknoten sollte Netzdienste sowohl anbieten als auch nutzen können. Vor dem Hintergrund beschränkter Ressourcen tragbarer Geräte, und insbesondere einer zu erwartenden nur moderaten Verbesserung der Batterie-Technologie stellen Knoten, die Pakete nicht weiterleiten, ein Problem dar. Im Kontext von IPonAir müssen deshalb auch Fragestellungen hinsichtlich der Sicherstellung einer solchen Kooperation untersucht werden.

Die im Rahmen dieses Beitrags vorgestellten Arbeiten in IPonAir fokussieren auf eng mit dem Routing verknüpfte Themenbereiche. Ziel dieses Beitrags ist es, einen Überblick über die Arbeiten in IPonAir zu geben. Vertiefende Diskussionen der jeweiligen technischen Aspekte können den angeführten Literaturreferenzen entnommen werden – eine detaillierte Diskussion würden den Rahmen dieses Beitrags deutlich sprengen.

Der Beitrag ist wie folgt strukturiert. Abschnitt 2 gibt einen Überblick über die Arbeiten aus dem Bereich Ad-hoc-Routing, insbesondere der Skalierbarkeit und des Unicast-, Multicast-, QoS- sowie des Infrastruktur-basierten Routings. Auf die Arbeiten bezüglich Management und Service Discovery wird in Abschnitt 3 eingegangen. Die Anbindung von mobilen Ad-hoc-Netzen an das Internet wird in Abschnitt 4 diskutiert. Um die IPonAir-Systemarchitektur auch kommerziell anwenden zu können, ist die Entwicklung von Geschäftsmodellen und sicheren Abrechnungsprotokollen zur Kommunikation in mobilen Ad-hoc-Netzen unabdingbar. In Abschnitt 5 wird auf diese Aspekte eingegangen.

2 ROUTING IN MOBILEN AD-HOC-NETZEN

Eine Herausforderung in der oben beschriebenen Systemarchitektur stellt das Auffinden eines Pfades sowohl in der dynamischen Topologie der Ad-hoc-Domäne, als auch domänenübergreifend in der Integration mit anderen Netzteilen (z.B. Festnetz) dar. In den folgenden Abschnitten werden die Arbeitsgebiete des IPonAir-Projekts hinsichtlich des Routings in Ad-hoc-Domänen vorgestellt.

2.1 Unicast und Skalierbarkeit

Da sich im oben genannten Beispielszenario sehr viele Knoten in der Ad-hoc-Domäne befinden können, sollte das verwendete Routingverfahren auch mit einer großen Knotenanzahl möglichst effizient funktionieren. Derzeit wird untersucht, wie gut bisher entwickelte Protokolle in Bezug auf die Knotenanzahl, den Mobilitätsgrad und die Verkehrslast skalieren. Erste Ergebnisse zeigen, dass hierarchische Routingprotokolle in Bezug auf die Knotenanzahl besser skalieren als Protokolle ohne Hierarchie und dass reaktive Routingprotokolle bei geringer Anzahl von Verbindungen den geringsten Overhead erzeugen. Deshalb wird

an einer Erweiterung des Routingprotokolls AODV gearbeitet, um hierarchisches Routing zu unterstützen. Die Effizienz von hierarchischen Routingprotokollen hängt allerdings stark vom Vorhandensein einer geeigneten und stabilen hierarchischen Struktur ab. Daher werden derzeit Verfahren entwickelt, die möglichst stabile Hierarchien durch Erkennung von Gruppenmobilität aufbauen.

2.2 Multicast

Einige Anwendungen, wie z.B. Internet-Radio, benötigen eine Multicast-fähige Vermittlungsschicht. In den letzten Jahren wurde eine Reihe unterschiedlicher Multicast-Routingprotokolle, mit zum Teil völlig unterschiedlichen Ansätzen vorgestellt. Eine sehr einfache und nicht besonders effiziente Möglichkeit zur Realisierung eines Multicast-Dienstes besteht z.B. darin, die Multicast-Daten im Ad-hoc-Netz zu fluten [4]. Des Weiteren wurde eine Reihe zustandsloser und zustandsbehafteter Multicast-Routingprotokolle entwickelt. Zustandslose Multicast-Routingprotokolle, wie z.B. DDM [5], zeichnen sich dadurch aus, dass sie die für die Weiterleitung der Pakete notwendigen Informationen in jedem Datenpaket mitschicken. Zustandsbehaftete Multicast-Routingprotokolle, wie z.B. ODMRP [6], dagegen bauen eine Verteilstruktur im Ad-hoc-Netz auf, über die dann die Daten an die Empfänger weitergeleitet werden.

Im Rahmen von IPonAir wird die Skalierbarkeit der genannten Verfahren untersucht. Von besonderem Interesse ist dabei das Verhalten der Protokolle bei steigender Knoten- bzw. Gruppenanzahl und bei steigender Gruppengröße. Protokolle, die auf dem Fluten der Daten basieren, skalieren nicht mit der Knoten- und Gruppenanzahl, da das Fluten der Nachrichten viel Overhead erzeugt. Zustandslose Protokolle, die in jedem Datenpaket, die für die Weiterleitung zu jedem Empfänger benötigten Informationen, mitschicken, skalieren dagegen nicht bei steigender Gruppengröße. Zustandsbehafteten Protokoll skalieren bezüglich der Knotenanzahl zwar deutlich besser als Protokolle die auf Fluten basieren und bezüglich der Gruppengröße besser als zustandslose Protokolle, allerdings skalieren diese nicht bezüglich der Gruppenanzahl, da für jede Gruppe eine separate Verteilstruktur erzeugt und gewartet werden muss. Derzeit wird im Rahmen des Projektes an der Entwicklung eines zustandsbehafteten Multicast-Routingprotokolls gearbeitet, bei dem der Ressourcenverbrauch für die Wartung der Verteilstrukturen, durch Minimierung der Medienzugriffe, soweit wie möglich reduziert wird.

2.3 Dienstgüte

Es existieren, mit den in 2.1 und 2.2 aufgeführten Einschränkungen, bereits zahlreiche Routingprotokolle, die die Kommunikation zwischen zwei beliebigen Knoten eines Ad-hoc-Netzes ermöglichen [7]. Sobald aber anspruchsvollere Anwendungen wie z.B. Sprachübertragungen unterstützt werden sollen, geraten diese Ansätze sehr schnell an ihre Grenzen: Damit ein Gespräch flüssig stattfinden kann, sollte die Verzögerung von Sprachdaten laut ITU-Empfehlung nicht mehr als 150ms betragen [8]. Klassische QoS-Ansätze, die

QoS-Ansätze, die Bandbreitenreservierungen für einzelne Ströme oder Verkehrsklassen vornehmen, sind in Ad-Hoc-Netzen nicht anwendbar, weil eine tatsächliche Reservierung nur dann möglich ist, wenn eine Station die Kontrolle über die Verteilung dieser Bandbreite hat. In drahtlosen Netzen ist dies nicht gegeben, da im Gegensatz zu verdrahteten Netzen mit geteiltem Medium die Zuordnung von Stationen zu einem Link nicht klar ist.

Immerhin können Priorisierungsmechanismen dafür sorgen, dass Datenpakete von Echtzeitanwendungen so wenig wie möglich von Datentransfers ohne Echtzeitanforderungen beeinflusst werden. Grundsätzlich sollte dafür gesorgt werden, dass die Dienste der unteren Schichten möglichst positive Eigenschaften für Echtzeitanwendungen bieten. Gerade im Rahmen der Mobilkommunikation ist dies äußerst schwierig.

Die Auswahl möglichst „stabiler“, d.h. langlebiger, Routen verspricht eine Verringerung der Anzahl der Verbindungsunterbrechungen, die durch Linkabbrüche und die daraus resultierende Wartezeit bis zum Wiederherstellen einer Alternativroute entstehen. Einige Ansätze existieren bereits, z.B. "Associativity Based Routing" (ABR) und "Signal Stability Based Routing" (SSR) [7], jedoch fußen diese auf der intuitiven Vorstellung, dass Links, die bereits eine längere Zeit bestehen, mit höherer Wahrscheinlichkeit auch noch länger halten werden. Allerdings zeigt sich in näheren Untersuchungen, dass diese Annahme so pauschal nicht haltbar ist [9].

Erste Ergebnisse des IPonAir-Projekts zeigen aber, dass die zu erwartende verbleibende Lebenszeit eines Links sich in der Tat mit seinem Alter ändert [9]. Mit dieser Erkenntnis wird es möglich, Routen zu etablieren, die mit höherer Wahrscheinlichkeit innerhalb einer bestimmten Zeit verfügbar bleiben, mithin stabiler sind.

Ein anderer Ansatz ergibt sich aus Mechanismen, die abhängig von dem Signal-to-Noise-Ratio (SNR) jeder einzelnen Verbindung ein geeignetes Kodierungsverfahren wählen. Bei schlechterer Linkqualität wird ein Kodierungsverfahren verwendet, das zwar eine geringere Datenrate gestattet, dafür aber robuster ist und trotz geringerem SNR eine Datenkommunikation zulässt. Informationen über die auf einem Link verwendeten Kodierungsverfahren können also von höheren Schichten verwendet werden, um die Stabilität eines Links abzuschätzen und Mechanismen zur Routenerneuerung in Gang zu setzen, noch bevor ein Link tatsächlich abbricht.

Neben den Echtzeitanforderungen bestimmter Anwendungen steht deren Bedarf an gewissen Mindestbandbreiten. Nun verfügen Funknetzwerke aus verschiedenen Gründen über erheblich geringere Bandbreiten als Festnetze, wie in [10] dargelegt wird.

Existierende Arbeiten zeigen aber, dass die Kapazität von Ad-hoc-Netzen durch die Regelung der Sendeleistungen der mobilen Knoten erheblich gesteigert werden kann. Die dazu bisher vorgeschlagenen Konzepte leiden jedoch unter diversen Schwächen. Das Finden einer optimalen einheitlichen Sendeleistung (z.B. in [11]) erfordert einen hohen Protokolloverhead und führt zu Engpässen in dicht besiedelten Bereichen eines Netzes (und damit auch zu einer unfairen Verteilung der Ressourcen), da sich sehr

viele Teilnehmer das Medium teilen müssen (wie z.B. in den 4 Hotspots in Abb. 3 links). Ein adaptiverer Ansatz ist die Regelung der Sendeleistung derart, dass nur eine konstante Zahl nächster Nachbarn erreicht wird [12], um so eine höhere Anzahl gleichzeitiger Übertragungen zu ermöglichen. Abb. 3 rechts verdeutlicht, dass die Konkurrenz in den Hotspots so verringert werden kann. [13] schlägt einen verteilten Algorithmus vor, der aber häufig dazu führen kann, dass einzelne Knoten das ganze Netz stören und es dadurch zum Erliegen bringen. Unter Verwendung eines Feedback-Mechanismus können mit einem alternativen Algorithmus diese Probleme voraussichtlich vermieden werden. Detaillierte Untersuchungen hierzu erfolgen derzeit.

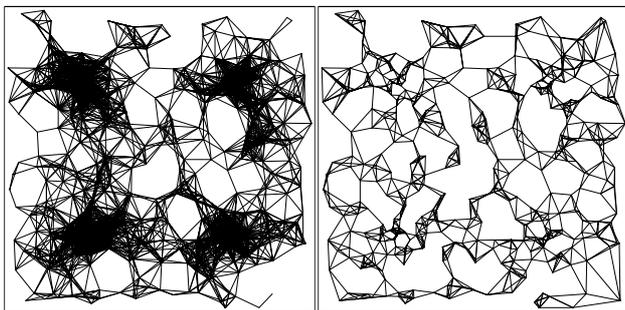


Abbildung 3: Auswirkung der Sendeleistungsregelung in einem Hotspot-Szenario

2.4 Infrastrukturbasiertes Routing

Da im Rahmen von IPonAir nicht nur von komplett abgekoppelten Ad-hoc-Domänen ausgegangen wird, sowie von der Existenz unterschiedlicher drahtloser Netze, kann diese Situation auch zur Verbesserung des Routings ausgenutzt werden. Konkret wird untersucht, inwiefern zellulare Netze zur Verbesserung des Routings in Ad-hoc-Domänen beitragen können. Darüber hinaus wird auch eine Erweiterung des Einzugsbereichs zellulärer Netze mit diesem Konzept ermöglicht. Dabei wird davon ausgegangen, dass die zellulare Abdeckung zusätzlich zur Ad-hoc-Domäne verfügbar ist und dass die mobilen Geräte über Schnittstellen zu beiden Netzen verfügen, die auch zeitgleich betrieben werden können (vgl. Abb. 4).

Die Erweiterung des Einzugsbereichs einer einzelnen Basisstation über ihre ursprüngliche Reichweite hinaus (ARCE, ad hoc routing for cellular coverage extension) [14] hat den Vorteil, dass weniger Basisstationen benötigt werden. Es ermöglicht aber auch eine effektive Lastverteilung zwischen den Basisstationen. Die Auswahl einer Basisstation basiert auf Anycast-Routing (s. Kap. 3.2). Hat ein Knoten eine Verbindung zu einer Basisstation, so reicht er eine Routenanforderung direkt an diese weiter. Ansonsten wird sie mit Hilfe eines Broadcasts an alle Nachbarn in der Ad-hoc-Domäne gesendet. Eine Basisstation erhält damit eine Anfrage mehrfach über unterschiedliche Pfade. Basierend auf den ihr zur Verfügung stehenden Informationen berechnet die Basisstation die aussichtsreichsten Routen. Durch die zentrale Sicht ist eine bessere Auslastung der Ad-hoc-Domäne möglich. Simula-

tionen zeigen, dass eine Berechnung von nur vier aussichtsreichen Routen bereits einen erkennbaren Vorteil mit sich bringt. Bei Ausfällen von Routen kann dann ohne erneute Routenanfrage auf die nächst beste Route umgestellt werden. Insgesamt wird die Anzahl der gesendeten Routenanfragen um ca. 50% reduziert, was den Routing-Overhead deutlich verringert, weil diese Anfragen geflutet werden müssen [15].

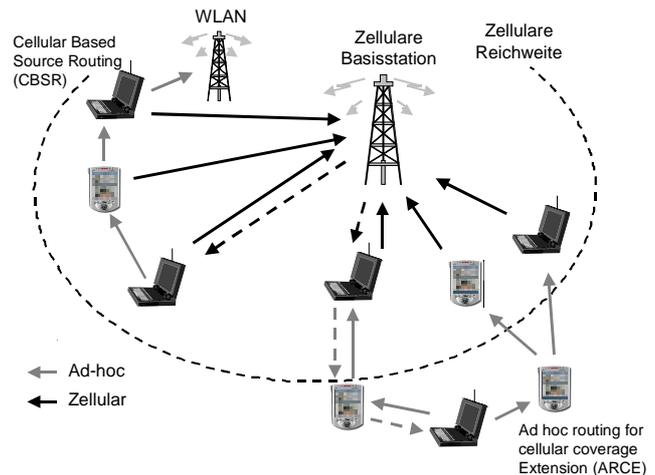


Abbildung 4: Beispielszenario Infrastrukturbasiertes Routing

Das Konzept des Cellular Based Source Routing (CBSR) [16] nutzt eine überlappende zellulare Infrastruktur zur Berechnung von Routen in der Ad-hoc-Domäne. Das diskutierte Verfahren wurde hinsichtlich des Source Routings verändert. Das zellulare Netz wird zur Verbreitung von Routinginformation genutzt. Jedes ad-hoc-fähige Endgerät versendet periodische "Hello"-Nachrichten an seine Nachbarn. Die dabei gesammelte Information wird über die zellulare Schnittstelle an die Basisstation weitergeleitet, die damit innerhalb einer Hello-Periode die Nachbarschaftsinformation von allen Teilnehmern erhält und über umfassende Informationen zur Netztopologie verfügt. Soll eine Kommunikation stattfinden, wird ein Verbindungsaufbauwunsch an die Basisstation gesendet, die aufgrund der vorhandenen Information den kürzesten Weg in der Ad-hoc-Domäne bestimmen kann.

Das skizzierte Verfahren stellt eine interessante Alternative zu bisher in der Literatur diskutierten verteilten Routing-Algorithmen dar. Es nutzt die aus bisherigen Telekommunikationsnetzen bekannte Möglichkeit der Out-of-Band-Signalisierung. Die analytischen Ergebnisse zeigen, dass CBSR einen niedrigen Protokoll-Overhead hat und insbesondere bei hoher Mobilität der Knoten zu sehr viel besseren Ergebnissen führt als verteilte ad hoc Routingverfahren [16]. Allerdings ist die Zusatzanforderung, Zugang zu beiden Netzen gleichzeitig zu haben, nicht zu vernachlässigen.

3 MANAGEMENT UND SERVICE DISCOVERY

3.1 Autokonfiguration

In mobilen Ad-hoc-Netzen stellt sich eine äußerst relevante Frage für den praktischen Betrieb: „Welche Adresse besitzt ein mobiler Knoten?“ Die Konfiguration der Adressen sollte auf Grund der selbstorganisierenden und dynamischen Eigenschaften eines mobilen Ad-hoc-Netzes automatisch und nach einem verteilten Mechanismus erfolgen. Eine besondere Herausforderung ist dabei die Verteilung und Beibehaltung eindeutiger Adressen auch nach einem Zusammenschluss von zwei unabhängigen, bereits konfigurierten Ad-hoc-Netzen.

Generell lassen sich Mechanismen zur Autokonfiguration in zustandsbehaftete und zustandslose Ansätze einteilen. Während bei zustandsbehafteten Protokollen, wie z.B. DHCP, a priori eindeutige Adressen von einer Verwaltungsinstanz zugewiesen werden, bilden sich die Knoten bei zustandsloser Autokonfiguration, wie z.B. IETF Zeroconf [17], die Adressen selbst und prüfen diese daraufhin auf Eindeutigkeit im Netz. Die genannten Protokolle sind allerdings nicht für Multi-hop-Netze geeignet und setzen eine Infrastruktur im Fall der zustandsbehafteten Ansätze voraus. Sie lassen sich daher nicht ohne weiteres in mobilen Ad-hoc-Netzen anwenden.

Eine mögliche Anpassung zustandsbehafteter Protokolle für mobile Ad-hoc-Netze besteht in der Verwaltung verteilter Adressen durch ein verteiltes Zustimmungsverfahren [18].

In [19] wird z.B. die Erweiterung zustandsloser Protokolle verfolgt, so dass die Erkennung doppelter Adressen auch zwischen nicht direkt benachbarten Knoten möglich wird. Dazu flutet jeder Knoten eine Anfrage im Netz, um zu bestimmen, ob die von ihm gewählte Adresse bereits vergeben ist. Allerdings können bei diesem Ansatz nach einem Netzzusammenschluss doppelte Adressen auftreten.

Im Rahmen von IPonAir wurde zunächst das in IPv6 spezifizierte Protokoll zur zustandslosen Autokonfiguration auf seine Tauglichkeit in MANETs untersucht. Durch einige Anpassungen wird die Anwendung des Verfahrens in mobilen Ad-hoc-Netzen ermöglicht [20]. Die vorgeschlagenen Erweiterungen erlauben eine Erkennung doppelter Adressen auch nach einem Netzzusammenschluss und etablieren eine hierarchische Adressstruktur. Die Aufrechterhaltung der Hierarchie und die Erkennung doppelter Adressen erfordert zwar nicht mehr das Fluten im gesamten Netz, allerdings den periodischen Austausch von Kontrollnachrichten.

Um den Protokolloverhead für die Erkennung doppelter Adressen zu verringern, kann die Autokonfiguration mit dem Routingprotokoll integriert werden. In [21] wird vorgeschlagen, jeden Knoten nicht nur anhand der IP-Adresse, sondern zusätzlich anhand eines Schlüssels zu identifizieren. Da dieser u.U. zufällig gewählt wird, können in seltenen Fällen doppelte Adressen unentdeckt bleiben. Der Schlüssel wird mit Hilfe der Nachrichten des Routingprotokolls verteilt und verursacht daher zusätzlichen Protokolloverhead.

Um den Protokolloverhead weiter zu minimieren, können doppelte Adressen unter bestimmten Umständen durch Abhören des Routingprotokolls erkannt werden. Im Rahmen von IPonAir wurden drei Verfahren für Link-State Routingprotokolle entwickelt, die eine durchgehende Erkennung doppelter Adressen ermöglichen, ohne zusätzlichen Protokolloverhead zu erzeugen [22]. Die Anwendbarkeit auf andere Protokolle wird derzeit untersucht.

3.2 Service Discovery und Anycast-Routing

Mobilität bringt neue Anforderungen an die Konfiguration und Verwaltungen der Dienste in mobilen Ad-hoc-Netzen. Sowohl Dienstnehmer als auch Dienstgeber sind in der Regel mobil. Im Gegensatz zu den meisten vorhandenen Ansätzen zum Auffinden von Diensten, bei denen entweder eine feste Kommunikationsinfrastruktur zur Verfügung steht, oder sich die kommunizierenden mobilen Knoten in direkter Reichweite befinden, behandelt das Konzept „Service Awareness“ das effiziente Auffinden von Dienstgebern in mobilen Ad-hoc-Netzen. Solche Dienstgeber können beispielsweise Web-Proxies oder Ad-hoc-Gateways bzw. Basisstationen zellularer Netze sein, die den Dienst des Zugangs zu einem Festnetz bereitstellen.

Ein erster Ansatz besteht darin, einen Service Cache in jeden mobilen Knoten zu integrieren, in dem Informationen über Dienste lokal gespeichert werden. Diese Informationen werden von Dienstgebern versendet und können von Dienstnehmern abgefragt werden. Jeder Dienst wird durch eine Service-ID identifiziert und kann unter Ausnutzung von Informationen des Routingprotokolls einem momentan gut geeigneten Dienstgeber zugeordnet werden, beispielsweise dem mit der geringsten Entfernung. Erste Simulationen zeigen, dass durch den Ansatz der Aufwand für das Auffinden eines Dienstes verringert werden kann [23].

Ausserdem wurde eine weitere Lösung auf der Basis des bei IPv6 vorhandenen Anycast-Routings konzipiert, welche besser skaliert hinsichtlich der Knotenanzahl und Anzahl der angebotenen Dienste. Der verfolgte Ansatz erweitert das Routingprotokoll AODV um Anycast-Routing [24].

4 INTERNETANBINDUNG

Wie eingangs erwähnt, wird im Projekt IPonAir davon ausgegangen, dass die Ad-hoc-Domänen zumindest zeitweise über einen Zugang zum Festnetz verfügen. Im folgenden wird ein Konzept zur Internetanbindung präsentiert.

4.1 Ad-hoc-Gateway

Am Übergangspunkt zwischen Festnetz und mobilen Ad-hoc-Netz treffen unterschiedlichen Konzepte zur Adressierung, der Wegwahl und der Mobilitätsverwaltung aufeinander. Möchte man nun eine direkte Anbindung der Netze erzielen, ohne dass neue, netzübergreifende Protokolle entwickelt und diese auf allen daran beteiligten Endgeräte im Fest- und im Ad-hoc-Netz verfügbar sein müssen, so benötigt man an dem Übergangspunkt eine entsprechende

Umsetzungseinheit. Das Konzept eines solchen Ad-hoc-Gateways (A-GW) wird im Rahmen des Projektes IPonAir entwickelt [25].

Aufgabe des Ad-hoc-Gateways ist es, einen nahtlosen Übergang zwischen Festnetz und Ad-hoc-Domäne zu realisieren. Einen wichtigen Aspekt bildet dabei ein für den mobilen Knoten transparenter Zugriff auf IP-Dienste des Festnetzes. Hierzu werden entsprechende Proxies angeboten. Das A-GW verfügt an seinen Netzschnittstellen über die jeweiligen Standard-Routingprotokolle und nimmt, falls erforderlich, die Umsetzung zwischen Ad-hoc-Routing-Mechanismen und infrastrukturbasierten Routing-Mechanismen vor.

Um einen Ad-hoc-Knoten aus dem Festnetz erreichbar zu machen, muss dieser dort bekannt sein. Mit Hilfe des A-GWs wird er bei einer zentralen Anmeldestelle (z.B. einem Home-Agent), angemeldet. Das Gateway wird dann regelmäßig prüfen, ob das angemeldete Endgerät noch innerhalb der Ad-hoc-Domäne erreichbar ist oder nicht. Ist dies nicht mehr der Fall, so meldet das Gateway den entsprechenden Knoten bei der Anmeldestelle wieder ab.

Das A-GW ist nicht ortsgebunden. Da die Verbindung zu den unterschiedlichen Netzen mittels Funk erfolgt, ist es möglich, das Gateway als mobile Einheit zu realisieren. Dabei muss bei den Routingverfahren nun nicht mehr nur die Mobilität der Knoten, sondern auch die eigene Mobilität des A-GWs berücksichtigt werden.

Das A-GW kann entweder von einem Netzbetreiber eingerichtet werden und öffentlich zugänglich sein, oder aber nur einer privaten Gruppe zur Verfügung stehen. Darüber hinaus ist es auch möglich, dass die Gateway-Funktionalität durch ein privates Endgerät anderen Nutzern angeboten wird. Auch wenn die Funktionalität des Gateways in allen Fällen dieselbe ist, so müssen für die verschiedenen Anwendungsszenarien unterschiedliche Sicherheits- und Billing-Konzepte entwickelt werden. Dies ist ebenfalls ein Bestandteil des Projektes.

4.2 Mobilitätskonzepte basierend auf Mobile IP

Die Integration von Mobile IP in die beschriebenen Szenarien eröffnet eine Vielzahl an neuen Einsatzmöglichkeiten von Ad-hoc-Netzen im privaten und öffentlichen Bereich. Ein wesentlicher Vorteil bei Mobile IP ist der unterbrechungsfreie Wechsel (seamless Handoff) einer aktiven Internet-Verbindung von einer Netz-Domäne hin zu einer anderen. Hierbei wird eine globale IP-Adresse beibehalten, wodurch unterbrechungsfreie Mobilität garantiert werden kann. Dies ist besonders für Sprachdienste, wie z.B. IP Telephonie erforderlich.

Ein hierbei durchgeführter Mobile IP Handoff zwischen einem Ad-hoc-Netz und einem zellularen Mobilfunksystem wird durch die Tatsache unterstützt, dass die mobilen Knoten über mehrere drahtlose Schnittstellen und über unterschiedliche Zugangssysteme verfügen. Um den erforderlichen Handoff zwischen den Zugangssystemen durchführen zu können, bedarf es jedoch den Einsatz von Mobile IP [26].

Bei der Integration von Mobile IP-Diensten in Ad-hoc-Netze ist ein hierarchischer Entwurf der Netzstruktur besonders wirkungsvoll, um die Erreichbarkeit der mobilen Ad-hoc-Knoten zu garantieren und einen verzögerungsfreien Handoff zu unterstützen. Die Minimierung von Verzögerungen bei Mobile IP Handoffs ist zwingend, um Paketverluste bei einer bestehenden Datenverbindung zu vermeiden, wodurch ein wesentliches Kriterium für QoS-Anwendungen erfüllt werden kann. Es ist erforderlich, dass lokale Handoffs in IP-Netzen direkt durch die lokale Infrastruktur durchgeführt werden können. Hierdurch werden Verzögerungen minimiert, und der Austausch von Mobile IP-Registrierungsdaten findet lokal statt. Die Unterstützung der sogenannten Micro-Mobilität wird mittels Hierarchical Mobile IP (HMIP) in IPonAir näher untersucht, um die Effizienz bei Handoffs zu optimieren.

Um einen Handoff zwischen UMTS und Ad-hoc-Netzen zu unterstützen, wird basierend auf Mobile IP ein sogenannter Policy based Handoff durchgeführt, wenn Qualitätsparameter nicht mehr erfüllt werden (z.B. zu hohe Latenzzeiten) und ein anderes Zugangssystem zur Verfügung steht. Hierbei erfolgt der Handoff zwischen UMTS und einem Ad-hoc-Netz automatisch und völlig transparent für den mobilen Knoten, wobei das Entscheidungskriterium auf einer Kostenfunktion basiert, deren Entwurf im IPonAir-Projekt erarbeitet wird.

5 GRUNDVORAUSSETZUNG KOOPERATION

Wie bei der Diskussion der zugrunde liegenden Systemarchitektur bereits erwähnt, spielt die Kooperation der mobilen Knoten eine wichtige Rolle hinsichtlich der Funktionsfähigkeit von Ad-hoc-Domänen.

5.1 Detektionsbasierte Kooperation

Wünschenswert ist die Erkennung, ob Netzknoten in Ad-hoc-Domänen tatsächlich Pakete weiterleiten. Dies schafft die Voraussetzung für ein Bewertungssystem, welches dazu dient, nicht kooperierende Knoten auszuschließen, um gleichzeitig bessere Netzdienste für kooperierende Knoten anzubieten. In [27] wird ein detektionsbasierter Ansatz vorgestellt. Insbesondere wird aktiven Angriffen zwischengeschalteter Knoten begegnet, welche schon in der Phase der Pfadetablierung darauf abzielen, dass sie in der anschließenden Phase der Nutzdatenübertragung nicht auf dem gewählten Übertragungspfad liegen. Ein wesentliches Problem, welches detektionsbasierte Ansätze mit einem verteilten Bewertungssystem zu lösen haben, ist es, eine nicht bzw. nur schwach abstreitbare Anklage der beobachtenden Knoten zu formulieren. Mittels eines defensiven, mehrheitsbasierten Inferenzmechanismus der 'offline' am Senderknoten ausgeführt wird, werden auch Knoten die mehrere Hops vom nicht kooperierenden Knoten entfernt sind, auf einen solchen Knoten aufmerksam.

5.2 Motivationsbasierte Kooperation

In [28] wird ein Ansatz vorgestellt, der die Knoten zur Kooperation im Ad-hoc-Netz motiviert. Dies erscheint hinsichtlich der Ressourcenbeschränkung mobiler Knoten

vorteilhaft, da tatsächlich nur diejenigen Knoten Ressourcen zur Verfügung stellen, die einen Nutzen mit der Datenübertragung verbinden. Sei es als Dienstanutzer oder aber, dass sie als mobiler Provider einen geldwerten Vorteil erlangen.

Neben einem Geschäftsmodell, wird auch eine technische Umsetzung des Ansatzes, das ‚Secured Charging Protocol‘ (SCP), vorgestellt. Ausgehend von einer nicht immer bestehenden Anbindung an das Festnetz wird unter Einsatz kryptographischer Primitive der innerhalb einer Gebührenperiode im Ad-hoc-Netz weitergeleitete Verkehr zweifelsfrei am Zugangsrouten (z.B. Ad-hoc Gateway) zugeordnet, in Rechnung gestellt, bzw. gutgeschrieben. Dabei belohnt der zum angrenzenden Festnetz gehörende Internet Service Provider (ISP) die für das Routing benötigten zwischengeschalteten mobilen Knoten derart, dass die Summe ihrer Belohnungen nicht die vom Sender und Empfänger eingenommenen Gebühren übersteigt. Sollten Knoten versuchen, das Modell zu ihren Gunsten auszunutzen, indem sie ausschließlich weiterleiten und nicht senden bzw. empfangen, so ist der ISP in jedem Fall der Gewinner. Allgemein kann argumentiert werden, dass die mittels SCP entstandene Chance der ISPs auch geldwert von drahtlosen Multi-hop-ad-hoc-Netzen zu profitieren, dazu dient, vorhandene Vorbehalte gegen derartiger Architekturen abzubauen.

Zur technischen Umsetzung des Secured Charging Protocols wurden digitale Signaturen mittels EC-DSA basierend auf Koblitz-Kurven realisiert. Dieser Vertreter der kostengünstigen Elliptische-Kurven-Technologie, sowie das ebenfalls genutzte Konzept schlüsselbehalteter Hashketten machen SCP auch auf ressourcenschwache Geräten einsetzbar. Gegenwärtig erfolgt eine prototypische Implementierung unter Linux.

5.3 Wirkung von Kooperation

Eine Intensivierung des Partizipierens einzelner Knoten in der Phase des Weiterleitens von Nutzdaten erscheint vorteilhaft für das Ad-hoc-Netz. In [29] ist die Annahme ausgehend von einem einfachen, aber aussagekräftigen Partizipationsmodell untersucht worden. Es wurde der ‚gray hole‘-Angriff analysiert, bei dem ein zwischengeschalteter Knoten in der Phase des Weiterleitens fremder Nutzdaten zufällig bzw. in Abhängigkeit von seinem gegenwärtigen Batteriestand nur teilweise Daten weiterleitet. Folgende Ergebnisse lassen sich zusammenfassen: Die Wirkung eines Kooperationsansatzes, auch wenn er das Partizipieren des einzelnen Knotens drastisch erhöht, ist in ‚großen‘ Ad-hoc-Netzen mit wachsenden durchschnittlichen Routenlängen nahezu bedeutungslos. In Netzen mit kleineren durchschnittlichen Routenlängen (bis zu 5 Zwischenknoten) ist ein Vorteil hinsichtlich einer Erhöhung des Ende-zu-Ende Durchsatzes immer dann zu verzeichnen, wenn das eingesetzte Kooperationsverfahren das Partizipieren einzelner Knoten über eine Schwelle von 80% allen weiterzuleitenden Verkehrs anhebt. Ist die Bereitschaft zur Kooperation im Netz also grundsätzlich schwach, dann kann auch eine starke Erhöhung des Partizipierens Einzelner den Ende-zu-Ende-Durchsatz im Netz nicht signifikant erhöhen. Zeichnen sich die Knoten dage-

gen schon per se durch ein moderates Kooperationsverhalten aus, so bewirkt der Einsatz eines Kooperationsverfahrens oftmals eine drastische Erhöhung der gesamten Erreichbarkeit im Netz. Dies gilt für lose Netztopologien und verbindungslosen Verkehr.

ZUSAMMENFASSUNG

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMB+F) geförderte Projekt IPonAir befasst sich mit der Integration unterschiedlicher Mobilfunktechniken mit dem Internet. Dieser Artikel gibt einen Überblick über die zugrunde liegende Systemarchitektur und über die im Rahmen des Projektes durchgeführten Arbeiten zu mobilen Ad-hoc-Netzen. Schwerpunkte bilden dabei verschiedene Aspekte des Routings, die Autokonfiguration, das Auffinden von Diensten, die Integration mit dem Internet und Geschäftsmodelle bzw. dazu gehörende sichere Abrechnungsprotokolle. Im Bereich Routing sind insbesondere die Themen Skalierbarkeit, Multicast, QoS und Ausnutzung der Infrastruktur von Interesse.

LITERATUR

- [1] Webseite Projekt IPonAir, <http://www.iponair.de>
- [2] M. Frodigh, S. Parkvall, C. Roobol, P. Johansson, P. Larsson, "Future-generation wireless networks", IEEE Personal Communications, Volume: 8, Issue: 5, Oct 2001, pp. 10-17
- [3] Webseite Projekt Fleetnet, <http://www.fleetnet.de>
- [4] J.G. Jetcheva, Y.-C. Hu, D.B. Johnson, "A Simple Protocol for Multicast and Broadcast in Mobile Ad Hoc Networks", I-D draft-ietf-manet-simple-mbcast-01.txt, Juli 2001
- [5] L. Ji, M. Scott Corson, "Differential Destination Multicast - A MANET Multicast Routing Protocol for Small Groups", In Proceedings of IEEE INFOCOM 2001
- [6] S.-J. Lee, W. Su, M. Gerla, "On-Demand Multicast Routing Protocol in Multihop Wireless Mobile Networks," ACM/Baltzer Mobile Networks and Applications, Special issue on Multipoint Communication in Wireless Mobile Networks, 2000
- [7] E. M. Royer, C. K. Toh, "A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks", IEEE Personal Communications April 1999, pp. 46-55
- [8] "Recommendation G.114 - One Way Transmission Time", ITU-T Standard G.114, 1996
- [9] M. Gerharz, C. de Waal, M. Frank, P. Martini, "Link Stability in Mobile Wireless Ad Hoc Networks", LCN 2002, Tampa, Florida
- [10] J. Li, C. Blake, D. S. J. De Couto, H. I. Lee, R. Morris, "Capacity of Ad Hoc Wireless Networks", ACM Mobicom 2001
- [11] S. Narayanaswamy, V. Kawadia, R. S. Sreenivas, P. R. Kumar, "Power Control in Ad-Hoc Networks: Theory, Architecture, Algorithm and Implementation of the COM-POW Protocol", European Wireless 2002
- [12] H. Takagi, L. Kleinrock, "Optimal Transmission Ranges for Randomly Distributed Packet Radio Terminals", IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-32, No. 3, pp. 246-257, März 1984

- [13] R. Ramanathan, R. Rosales-Hain, "Topology Control of Multihop Wireless Networks using Transmit Power Adjustment", IEEE Infocom 2000, pp. 404-413
- [14] I. Gruber, G. Bandouch, H. Li, „Ad Hoc Routing for Cellular Coverage Extension (ARCE)", IEEE VTC 2003, April 2003, Jeju, Koera
- [15] S.-J. Lee, W. Su, M. Gerla, "Split Multipath with Maximally Disjoint Path in Ad hoc Networks", Proceedings of IEEE ICC 2001, Helsinki, Finland, June 2001, pp. 3201-3205
- [16] D. Yu, H. Li, "Performance Comparison of Ad-Hoc and Cellular Based Routing Algorithms in Multihop Cellular Networks", 5th international symposium on wireless personal multimedia communications, October 2002, Honolulu, USA.
- [17] S. Cheshire, B. Aboba und E. Guttman, "Dynamic Configuration of IPv4 Link-Local Addresses", draft-ietf-zeroconf-ipv4-linklocal-07.txt, Aug. 2002
- [18] S. Nesargi und R. Prakash, "MANETconf: Configuration for Mobile Ad Hoc Networks", Proceedings of INFOCOM'02, New York, USA, 2002
- [19] C. E. Perkins, J. T. Malinen, R. Wakikawa, E. Royer und Y. Sun, "IP Address Autoconfiguration for Ad Hoc Networks", draft-perkins-manet-autoconf-01.txt, Nov. 2001
- [20] K. Weniger, M. Zitterbart, "IPv6 Autoconfiguration in Large Scale Mobile Ad-Hoc Networks", Proceedings of European Wireless 2002, Florence, Italy, Feb. 2002.
- [21] N. H. Vaidya, "Weak Duplicate Address Detection in Mobile Ad Hoc Networks", Proceedings of MobiHoc, Lausanne, Switzerland, 2002
- [22] K. Weniger, "Passive Duplicate Address Detection in mobile Ad Hoc Networks", to Appear in proceedings of WCNC 2003, New Orleans, USA, Mar 2003.
- [23] J. Wu, M. Zitterbart, "Service Awareness and its Challenges in Mobile Ad Hoc Networks" , Workshop der Informatik 2001: Mobile Communication over Wireless LAN: Research and Applications, Wien, Österreich, September, 2001
- [24] J. Wu, M. Zitterbart, "Extension for Anycasting in Ad Hoc On-Demand Distance Vector Protocol", 12th IEEE Workshop on Local and Metropolitan Area Networks, August 11-13 2002, Stockholm, Sweden
- [25] B. Xu and S. Hischke, "An IP-based Broadband Access Network Architecture supporting Ad hoc Networking Integration". In Proceedings of the Eurescom Summit '02 , Heidelberg, Germany, October 2002.
- [26] S. Aust, D. Proetel, A. Könsgen, C. Pampu, C. Görg, "Design Issues of Mobile IP Handoffs between General Packet Radio Service (GPRS) Networks and Wireless LAN (WLAN) Systems", Proceedings of WPMC 2002, Hawaii, USA, October 2002
- [27] K. Paul, D. Westhoff, "Context Aware Detection of Selfish Node in DSR based Ad-hoc Network", IEEE GLOBECOM 2002, Taipei, Taiwan, November 2002.
- [28] B. Lamparter, K. Paul, D. Westhoff, "Charging Support for Ad Hoc Stub Networks", Journal of Computer Communication, Special Issue on 'Internet Pricing and Charging: Algorithms, Technology and Applications', Elsevier Science, Summer 2003.
- [29] M. Plaggemeier, B. Lamparter, D. Westhoff, "Analysis of Co-operation Approaches in Ad Hoc Networks", WiOpt'03: Modeling and Organization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, INRIA Sophia-Antipolis, France, March 2003.